

Serge Marlet

SEPI-G: SYSTEME D'EVALUATION ET DE PLANIFICATION DES PERFORMANCES DES IRRIGATIONS GRAVITAIRES¹.

Serge MARLET, Alain CLOPES, Bruno LIDON et Florent MARAUX²

RÉSUMÉ

SEPI-G est un logiciel conçu comme un outil pratique d'aide à la conception d'aménagement, à la planification ou à l'évaluation de leur mode de gestion dans le contexte de systèmes de distribution gravitaire à la raie ou par calant à l'échelle de la parcelle. Il est composé d'un modèle d'évaluation des performances hydrauliques des irrigations couplé à un modèle simple de bilan hydrique basé sur les méthodes diffusées dans les bulletins d'irrigation et de drainage de la FAO. Les contraintes liées à la gestion du réseau sont prises en compte sous la forme de critères spécifiques portant sur la date ou la fréquence des irrigations. SEPI-G est conçu comme un gestionnaire de données nécessaires à la simulation du bilan hydrique et permet de prendre en compte de la variabilité du milieu physique et des techniques. Il est orienté vers l'analyse pluri-annuelle et fréquentielle du bilan hydrique. La nécessité d'une prise en compte à la fois des performances hydrauliques réelles du système d'irrigation et de la variabilité du milieu physique est démontrée à travers l'exemple du périmètre de Sona (Niger).

ABSTRACT

SEPI_G is a software conceived as a useful tool for dimensioning and planning irrigated frameworks, and evaluating the efficiency of their management at the field level for furrow irrigation. The software includes a model able to evaluate the hydraulic performances of the irrigation, coupled with a simple water balance model based on FAO irrigation and drainage papers. The constraints due to the irrigation network management are introduced in the model through imposed dates or frequency of irrigations. SEPI_G includes a data base for managing the input parameters that describes soil, climate, and plant characteristics, as well as the irrigation techniques. It is oriented to pluri-annual and frequencial analysis of the water balance model outputs that allow agronomic interpretations. The necessity of taking into account, in the same time, the actual hydraulic performances of the irrigation network, and the variability of the physical environment conditions is analysed through the example of the Sona irrigated area in Niger.

¹ SEPI_G: Evaluation system and performance planification of furrow irrigation

² CIRAD CA; Unité de Recherche "Gestion de l'Eau", BP 5035
34032 Montpellier France. Tel: (33) 67615640; Fax: (33) 67615642.

INTRODUCTION

Les méthodes et logiciels de gestion de l'irrigation reposent le plus souvent sur le calcul des besoins en eaux des cultures à partir de données concernant le climat et les cultures. A l'exemple du logiciel CROPWAT [Smith, 1992], les résultats fournissent aux concepteurs ou aux gestionnaires des réseaux d'irrigation une information sur les besoins d'irrigation et permettent théoriquement d'éviter les effets négatifs induits par une irrigation excessive ou déficitaire. Cependant ce type d'approche s'avère vite insuffisante pour la gestion de systèmes irrigués dans la mesure où ne sont pris en compte: (i) Ni les performances hydrauliques du système de distribution de l'eau, que ce soit à l'échelle de la parcelle ou, en amont, du réseau hydraulique; (ii) Ni la diversité de situations induites par la variabilité du milieu physique (sol, pluviosité,...) et des systèmes de culture (cycle de culture, enracinement, sensibilité au stress hydrique,...). Ces insuffisances sont particulièrement importantes dans le cadre de systèmes d'irrigation gravitaire où la distribution de l'eau est soumise à des contraintes importantes liées à: (i) L'élaboration de règles collectives (tour d'eau) permettant de garantir de bonnes conditions de fonctionnement de l'infrastructure hydraulique et d'organiser un partage équitable de l'eau entre les attributaires et/ou parcelles; (ii) L'influence des propriétés du sol et des modalités d'apport sur l'infiltration de l'eau et les performances hydrauliques de l'irrigation à l'échelle de la parcelle.

SEPI-G est un logiciel conçu comme un outil pratique d'aide à l'évaluation des performances des irrigations gravitaires à la raie ou par calant. L'évaluation des performances hydrauliques repose sur la détermination de lois d'infiltration dont la connaissance permet de simuler les performances des irrigations en fonction des modalités d'apport et des caractéristiques des raies ou calants d'irrigation. L'évaluation des performances agronomiques est assurée par l'utilisation des performances hydrauliques simulées des irrigations dans un modèle de bilan hydrique. Orienté vers la planification et l'évaluation, SEPI-G n'est pas adapté au pilotage des irrigations qui nécessite la prise en compte plus élaborée des contraintes liées à la gestion hydraulique du système irrigué. Après une présentation des modèles hydraulique et de bilan hydrique, le logiciel SEPI-G sera utilisé pour l'évaluation des performances des irrigations sur le périmètre de Sona (Niger).

PRESENTATION DU MODELE HYDRAULIQUE

Evaluation des lois d'infiltration et d'avancement

Les méthodes d'irrigation de surface par infiltration posent un important problème de détermination des lois hydrauliques d'infiltration et d'avancement. Parmi les différentes formulations de la loi d'infiltration,

nous avons retenu la loi de Horton pour la facilité qu'elle procure dans la résolution de l'équation de Lewis-Milne (Eq. 1), décrivant le bilan volume dans une raie ou un calant pendant la phase d'avancement:

$$V_e(t) = Q \cdot t = V_s(t) + V_i(t) = A_0 \sigma X(t) + \int_0^t Z(t-\tau) X'(\tau) d\tau \quad (1)$$

où $V_e(t)$ est le volume entrant (m^3), $V_s(t)$ est le volume stocké (m^3), $V_i(t)$ est le volume infiltré (m^3), t est le temps (s), Q est le débit d'alimentation ($m^3 \cdot s^{-1}$), A_0 est la section mouillée en tête de raie (m^2), σ est un facteur d'amortissement (m), $X(t)$ est l'avancement de la lame d'eau (m) et $Z(t)$ est la loi d'infiltration ($m^3 \cdot m^{-1}$). La loi d'Horton s'écrit (Eq. 2):

$$Z(t) = a[1 - \exp(-bt)] + ct \quad (2)$$

où $a + ct$ représente l'asymptote de la loi d'infiltration ($m^3 \cdot m^{-1}$), a est la capacité initiale d'infiltration ($m^3 \cdot m^{-1}$), c est la capacité finale d'infiltration ($m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) et b est un coefficient (s^{-1}) caractérisant le régime transitoire d'infiltration. La résolution de l'équation de Lewis-Milne pour la loi de Horton conduit à la formulation suivante (Eq. 3) de la loi d'avancement [Philip et Farrell, 1964]:

$$X(t) = A[1 - \exp(\alpha t)] + B[1 - \exp(\beta t)] \quad (3)$$

avec (Eq. 4, 5, 6 et 7):

$$A = \left[\frac{Q}{(\beta - \alpha)} \right] \left[\frac{1}{A_0 \sigma} + \frac{\beta}{c} \right] \quad (4)$$

$$B = \left[\frac{Q}{(\alpha - \beta)} \right] \left[\frac{1}{A_0 \sigma} + \frac{\alpha}{c} \right] \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{-(c + ab + A_0 \sigma b) + \sqrt{(c + ab + A_0 \sigma b)^2 - 4cA_0 \sigma b}}{2A_0 \sigma} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{-(c + ab + A_0 \sigma b) - \sqrt{(c + ab + A_0 \sigma b)^2 - 4cA_0 \sigma b}}{2A_0 \sigma} \quad (7)$$

Une procédure numérique est utilisée pour l'ajustement des paramètres a , b et c de la loi d'infiltration. Elle est basée sur la comparaison des données d'avancement et, éventuellement, des pertes en colature, mesurées et simulées, où il s'agit de minimiser la fonction suivante (Eq. 8):

$$\Sigma [X(t) - \hat{X}(t)]^2 + \Sigma \left[\frac{X(t)}{V_e(t)} (V_e(t) - \hat{V}_e(t)) \right]^2 \quad (8)$$

où $X(t)$ et $\hat{X}(t)$ sont les données d'avancement mesurées et simulées (m), et $V_e(t)$ et $\hat{V}_e(t)$ sont les volumes écoulés en colature mesurés et simulés (m^3).

Estimation du volume stocké et du périmètre mouillé

Si la mesure des volumes stockés est possible, elle est généralement peu précise et fastidieuse et les méthodes d'estimation lui sont généralement préférées [Girousse, 1985]. Dans le logiciel SEPI-G, différentes méthodes sont proposées pour le calcul simultané de la section mouillée en tête de raie A_0 et du périmètre mouillé P_0 (m). La méthode la plus générale [Walker, 1989] repose sur la formule de Manning-Strickler (Eq.9), la formule empirique d'Elliot *et al.* [1982] (Eq.10) et la définition du rayon hydraulique R (m) (Eq.11):

$$A_0 = \frac{Q \cdot n}{\sqrt{S} \cdot R_0^{2/3}} \quad (9)$$

$$A \cdot R^{2/3} = p \cdot A^q \quad (10)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (11)$$

où n est le coefficient de rugosité de Manning (-), S est la pente (-), et p et q sont deux paramètres de "fonction de forme" caractéristiques de la forme de la raie d'irrigation. Si la forme de la section de raie est connue, les paramètres p et q sont obtenus par ajustement en fonction de la section mouillée et du périmètre mouillé calculés pour différentes hauteurs d'eau dans la raie d'irrigation à partir de la relation (Eq.12), obtenue en combinant les équations (10) et (11):

$$\frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} = p \cdot A^q \quad (12)$$

La connaissance des paramètres de fonction de forme p et q permet alors de calculer la section mouillée A_0 (Eq.13), le volume stocké V_s (Eq.14) et le périmètre mouillé P_0 (Eq.15) de la façon suivante:

$$A_0 = \left(\frac{Q \cdot n}{p \cdot \sqrt{S}} \right)^{1/q} \quad (13)$$

$$V_s(X) = \sigma \cdot A_0 \cdot X \quad (14)$$

$$P_0 = \left(\frac{1}{p} \cdot A_0^{5/3-q} \right)^{3/2} \quad (15)$$

Lorsque la forme de la raie n'est pas connue, le logiciel SEPI-G propose que les volumes stockés (Eq.16) et le périmètre mouillé (Eq.17) soient estimés par la méthode proposée par l'USDA-SCS [1983]:

$$V_s(X) = \frac{X}{0.305} (2.947 (\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}})^{0.753} - 0.0217) \quad (16)$$

$$P_0 = 0.265 (\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}})^{0.425} + 0.227 \quad (17)$$

Dans le cas d'un calant, le périmètre mouillé est assimilé à la largeur W (m) du calant tandis que le volume stocké est calculé par l'équation (18) qui représente un cas limite des équations (13) et (14):

$$V_s(X) = (\frac{W^{2.3} \cdot Q \cdot n}{\sqrt{S}})^{0.6} X \quad (18)$$

Acquisition des paramètres

L'expérimentation suppose la sélection préalable d'une ou plusieurs raies ou calants représentatifs d'un type de sol donné. Dans un premier temps, sont caractérisés: (i) la longueur; (ii) la largeur ou l'écartement entre les raies; (iii) la pente; et (iv) la forme de la raie.

La raie est ensuite équipée: (i) de jalons à différentes abscisses pour le suivi de l'avancement; (ii) d'un seuil de mesure du débit d'alimentation en amont de la raie; et éventuellement (iii) d'un seuil de mesure des débits écoulés en collature. L'expérimentation est interrompue lorsque la lame d'eau atteint l'aval de la raie d'irrigation ou lorsque le débit se stabilise en colature, si il est mesuré.

Simulation des irrigations

Si l'essentiel de l'infiltration intervient pendant les phases d'avancement et d'entretien, la phase de récession de la lame d'eau, intervenant après l'arrêt de l'alimentation, est susceptible de contribuer à l'infiltration. SEPI-G propose différentes méthodes de calcul du temps de récession $Tr(X)$ (s) qui peut être: (i) négligée; (ii) assimilée à une fonction linéaire renseignée par la durée totale de la récession; (iii) assimilée à une fonction puissance renseignée par la méthode des deux points; (iv) simulée pour une raie bouchée par un calcul itératif basé sur la connaissance de la loi d'infiltration; ou (v) simulée pour une raie non bouchée par la méthode proposée par Turbak et Morel-Seytoux [1988] et adaptée par Mailhol [1992] (Eq.19):

$$Tr(X) = \left(\frac{X}{60\sqrt{Sc}} \right)^3 \quad (19)$$

La connaissance des coefficients de la loi d'infiltration, des volumes stockés et du périmètre mouillé permet alors de simuler les irrigations pendant les phases d'avancement, d'entretien et de récession et d'en évaluer les performances. SEPI-G calcule la lame d'eau infiltrée sur chaque quart de la raie ou du calant et les principaux indicateurs de performance hydraulique, comme indiqués dans le figure 1.

Performances de l'irrigation 64PI6RI-PPM				
Dose en mm	36.4	32.7	28.1	28.4
Durée de l'avancement en mn	87			
Dose brute en mm	33.7			
Dose nette en mm	28.4			
Efficacité hydraulique	60.7			
Dose moyenne infiltrée en mm	29.4			
Dose médiane en mm	30.5			
Pertes par percolation en mm	9.0	(26.7%)		
Pertes par évaporation en mm	4.3	(12.7%)		
Coefficient d'uniformité	59.5			
Longueur (en m)	88	Pente	8.0438	
Largeur (en cm)	88	Coef. de Manning	8.048	
Débit moyen (en l/s)	8.413			

Figure 1. Résultats de la simulation d'une irrigation

Prise en compte de l'état d'humectation du sol et synthèse des résultats

Les conditions expérimentales sont généralement différentes de celles qui prévalent lors des irrigations en conditions réelles. La principale source de variation est liée à la forte influence de l'état d'humectation du sol sur la loi d'infiltration. SEPI-G propose une procédure permettant de modéliser la loi d'infiltration en fonction de l'humidité du sol à partir des différents résultats obtenus pour un type de sol donné. Pour des raisons pratiques, l'état d'humectation a été assimilée au nombre de jours écoulés depuis la précédente humectation (notion de fréquence f). A l'exception du paramètre b , les paramètres a et c de la loi d'infiltration sont dépendants du périmètre mouillé P_0 et sont tout d'abord corrigés de la façon suivante (Eq.20):

$$a_0 = \frac{a}{P_0} \text{ et } c_0 = \frac{c}{P_0} \quad (20)$$

Les paramètres b et c_0 ($m.s^{-1}$) sont considérés indépendants de l'état d'humectation du sol et les valeurs médianes b (Eq. 21) et c_0 (Eq. 22) de ces coefficients ont été calculées de la façon suivante:

$$\bar{b} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{b_i}} \quad (21)$$

$$\bar{c}_0 = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln c_{0i}\right) \quad (22)$$

où n est le nombre d'observations.

La loi d'infiltration n'est influencée que par les variations de a_0 (m) qui ont été supposées proportionnelles à la racine-carré de la fréquence f (j) des humectations (Eq. 23):

$$a_0(f) = K \cdot \sqrt{f} \quad (23)$$

où K ($m.j^{-0.5}$) est un coefficient obtenu par ajustement entre les valeurs de a_0 et f obtenues lors des expérimentations. a_0 est égal à 0 le jour de l'humectation où le régime d'infiltration a atteint son régime permanent.

Le logiciel SEPI-G calcule la lame d'eau infiltrée (i) pour chaque quart de la raie d'irrigation; (ii) en fonction de différentes fréquences d'apport de 2 à 10 jours; (iii) en fonction des caractéristiques de la raie ou du calant: longueur, largeur, pente, coefficient de rugosité; et (iv) des modalités de conduite des irrigation: débit d'alimentation, durée de la période d'entretien, type de récession. Les résultats sont sauvegardés dans un fichier et seront utilisés dans le modèle destiné au calcul du bilan hydrique.

PRESENTATION DU MODELE DE BILAN HYDRIQUE

Termes du bilan hydrique

Le modèle considère les variations journalières du stock d'eau disponible dans la Réserve Utile Racinaire, RUR (mm), définie par la Réserve Utile du sol RU ($mm.m^{-1}$) et la profondeur colonisée par les racines (en mm). L'accroissement de la RUR est déterminée par la vitesse de croissance racinaire ($cm.j^{-1}$) et la profondeur maximale d'enracinement. Les différents termes du bilan (fig. 2) sont: (i) La pluviométrie efficace Pe (mm) calculée par différences entre la lame d'eau précipitée P (m) et la lame ruisselée Lr (mm); (ii) La lame d'eau infiltrée au cours de l'irrigation I (mm) calculée par le modèle hydraulique ou déterminée par l'utilisateur; (iii) l'Evaporation réelle du sol Er ($mm.j^{-1}$); (iv) la Transpiration réelle de la culture Tr ($mm.j^{-1}$); et (v) les percolations profondes ou drainage D ($mm.j^{-1}$) sous la profondeur maximale d'enracinement.

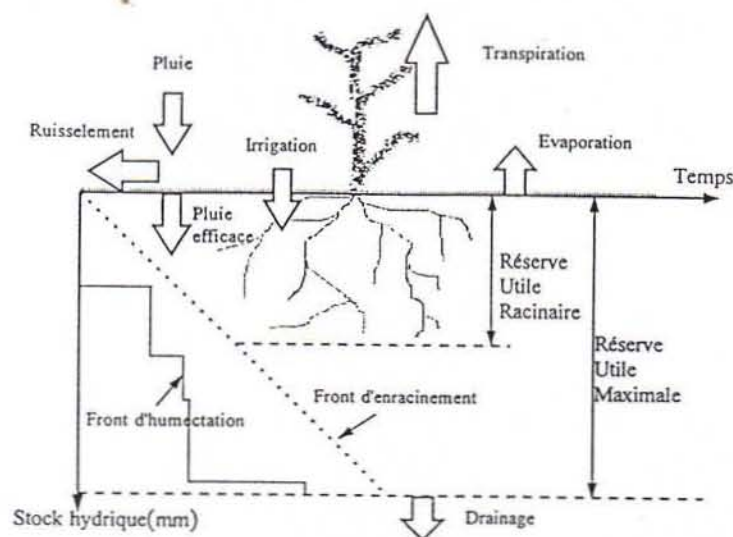


Figure 2. Présentation schématique des termes du bilan hydrique

Calcul de la lame ruisselée:

SEPI-G propose différentes formules d'estimation du ruissellement qui peut être: (i) négligé; (ii) simulé en fonction d'un seuil d'apparition du ruissellement et d'un pourcentage de ruissellement au-delà de ce seuil; ou (iii) simulé en fonction d'une méthode proposée par Casenave et Valentin [1989] (Eq. 24).

$$Lr = a.P + b.IK + c.P.IK + d, \text{ avec } IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) \exp^{-0.5(t_n - t_{n-1})} \quad (24)$$

où IK est un indice d'antériorité décrivant l'état d'humectation des horizons superficiels; t_n est le jour de la pluie n ; a, b, c et d sont quatre coefficients, fonctions de l'organisation structurale de la croûte superficielle.

Calcul de la transpiration réelle:

La transpiration potentielle Tp est calculée à partir de l'évapotranspiration de référence ET_0 (mm.j^{-1}) et d'un coefficient cultural Kc (-) (Eq.25):

$$Tp = Kc.ET_0 \quad (25)$$

Le cycle végétatif de la culture est divisé en trois phases. Durant la phase I de développement végétatif, le coefficient cultural augmente linéairement en fonction du temps, de 0 à la date du semis jusqu'à Kc_{max} .

Durant la phase II de plein développement végétatif, le coefficient cultural est constant et égale à $K_{c_{max}}$. Pendant la phase III de maturation et senescence, le coefficient cultural décroît linéairement de $K_{c_{max}}$ à $K_{c_{fin}}$ à la fin du cycle végétatif. La durée des phases et les valeurs des coefficients $K_{c_{max}}$ et $K_{c_{fin}}$ correspondent aux valeurs proposées par le bulletin n° 24 d'Irrigation et de drainage de la FAO: "Les besoins en eau des cultures" [Doorenbos et Pruitt, 1976].

La transpiration réelle (Tr) est calculée en fonction d'un algorithme proposé par Linacre [1971] (Eq.26):

$$Tr = \min(K \cdot Hr^2; Tp) \quad (26)$$

où Hr est le taux de remplissage de la réserve utile racinaire (-) et K un coefficient ($mm.j^{-1}$) calculé en fonction du facteur p (-), défini comme la proportion facilement utilisable de la réserve utile racinaire (RFU/RUR) pour une transpiration potentielle moyenne de 5 mm/j, tel que (Eq.27):

$$K = \frac{5}{(1-p)^2} \quad (27)$$

Cette formulation permet ensuite de moduler le facteur p (ou la réserve facilement utilisable) en fonction des variations de la demande climatique. Dans notre approche, le facteur p doit être perçu autant comme un seuil d'apparition du stress hydrique que comme un critère opérationnel de déclenchement des irrigations.

Calcul de l'évaporation réelle

L'évaporation potentielle Ep ($mm.j^{-1}$) est calculée en fonction de la demande climatique et de la transpiration potentielle de la façon suivante (Eq.28):

$$Ep = \max(0; ET_0 - Tp) \quad (28)$$

L'évaporation réelle Er est calculée en fonction de l'évaporation potentielle Ep et d'un coefficient Ke (-) décrivant la décroissance du régime d'évaporation en fonction du temps (Eq. 29):

$$Er = Ke \cdot Ep \quad (29)$$

Ce coefficient Ke est calculé (Eq.30) à partir de deux algorithmes décrivant la décroissance du régime d'évaporation en fonction du temps t (jours) à partir: (i) de la texture du sol décrite par sa réserve utile RU ($mm.m^{-1}$) [d'après Wright, 1981] (Eq.31); et (ii) de l'évaporation potentielle

selon une formule établie à un pas de temps journalier à partir de l'abaque proposé dans le bulletin FAO n°24: "les besoins en eau des cultures" [Doorenbos et Pruitt, 1976] pour le calcul de l'évapotranspiration moyenne en début de cycle où (Eq.32):

$$Ke = \sqrt{Ke_1 \cdot Ke_2} \quad (30)$$

avec:

$$Ke_1 = 1 - \sqrt{\frac{t}{td}}, \text{ avec } td = 1.1428 + 0.02381 \cdot RU \quad (31)$$

$$Ke_2 = \exp\left(-\frac{t \cdot Ep}{16}\right) \quad (32)$$

Réponse des rendements à l'alimentation hydrique:

La réponse des rendements à l'alimentation hydrique est calculée à partir du taux de satisfaction des besoins en eau de la culture et d'un coefficient de réponse à l'eau K_y (-) selon la méthode proposée dans le bulletin FAO n° 33 "Réponse des cultures à l'eau" [Doorenbos et Kassam, 1979]. Cette méthode considère différentes périodes de sensibilité au cours desquelles la réponse de la culture est calculée de la façon suivante (Eq.33):

$$\frac{\text{Rendement}}{\text{Rendement potentiel}} = 1 - K_y \cdot \left(1 - \frac{Tr}{Tp}\right) \quad (33)$$

La réponse de la culture est estimée en fonction de la valeur minimale obtenue entre les différentes phases ou la durée totale du cycle de culture.

Paramétrage de la simulation:

Les paramètres nécessaires à la simulation peuvent être saisis ou modifiés à l'aide du logiciel SEPI-G. Les fichiers correspondants concernent: (i) les paramètres "sol et irrigation": doses infiltrées par quart de raie en fonction de la fréquence des irrigations, issues du modèle hydraulique, et réserve utile du sol; (ii) les paramètres "plante": durée des différentes phases, coefficients culturaux K_c , coefficients de réponse à l'eau K_y , facteur p , vitesse maximale et profondeur maximale d'enracinement; (iii) la pluviométrie journalière; et (iv) l'évapotranspiration décadaire de référence ET_0 .

Les fichiers retenus pour la simulation sont sélectionnés au sein d'une liste de fichiers disponibles. Les années retenues pour la simulation sont ensuite sélectionnées parmi les années pour lesquelles les données

climatiques sont disponibles. Puis, la date de démarrage de la culture et le stock hydrique initial sont indiqués. Enfin, les modalités de gestion de l'irrigation sont spécifiées selon des critères de date et de dose des irrigations. Jusqu'à 5 périodes peuvent être différenciées par des modalités distinctes de gestion de l'irrigation. Différents critères de date d'irrigation peuvent être sélectionnés au cours de la période considérée. Ces critères sont les suivants: (i) pas d'irrigation; (ii) saisie des dates d'irrigation; (iii) saisie d'une fréquence d'irrigation en jours; la date d'irrigation est ensuite décalée en fonction des épisodes pluviométriques; (iv) saisie d'une fréquence d'irrigation en jours ou d'un nombre d'irrigations hebdomadaires; l'irrigation est supprimée si la satisfaction des besoins en eau est assurée jusqu'à l'irrigation suivante; ou (v) l'irrigation est déclenchée par le modèle lorsque la satisfaction des besoins en eau n'est plus assurée. Différents critères de doses peuvent être sélectionnés au cours de la période considérée. En premier lieu, les doses d'irrigation peuvent être automatiquement recherchées dans le fichier sol-irrigation précédemment précisé. Il est aussi possible d'indiquer: (i) une dose pour chaque irrigation dont la date aura préalablement été saisie; (ii) une dose fixe ou (iii) une dose correspondant au remplissage de la réserve utile racinaire (RUR) à chaque irrigation.

Résultats

Différents types de présentation des résultats de la simulation pluri-annuelle sont proposés par le logiciel SEPI-G. Chaque type peut être présenté à l'écran, imprimé ou stocké dans un fichier. Les résultats du bilan hydrique peuvent tout d'abord être présentés globalement pour toute la saison de culture, (i) pour chaque année considérée ou (ii) sous forme d'une analyse fréquentielle des résultats. Ils peuvent ensuite être présentés de façon détaillée pour chacune des années considérées, (i) par journée, (ii) par pentade ou (iii) par décade. Ces résultats détaillés peuvent aussi être présentés sous forme de graphiques: (i) présentation de l'évolution du stock hydrique racinaire, comparé à la réserve utile racinaire et à la réserve facilement utilisable; ou (ii) présentation de l'évolution du cumul de différents paramètres que sont: la pluviométrie efficace P_e , l'évapotranspiration de référence ET_0 , la transpiration potentielle T_p et réelle T_r , l'évapotranspiration réelle ET_r et le drainage D . Enfin, les besoins d'irrigation sont analysés par année et sous forme d'une analyse fréquentielle des résultats. Les résultats présentés concernent les besoins totaux au cours du cycle de culture et les besoins décadaires de pointe.

SIMULATION: EXEMPLE DU PERIMETRE DE SONA (NIGER)

Le périmètre de SONA se situe sur une ancienne terrasse alluviale située en bordure de la vallée du fleuve Niger. Ces terrasses exondées s'opposent aux terrasses inondables, nommées cuvettes, à vocation essentiellement rizicole. Sous une surface presque plane, les alluvions

successivement déposées par les divagations du fleuve composent un milieu très hétérogène, disposé en une série de bourrelets sableux sensiblement parallèle au lit du fleuve, comblés par des alluvions de texture plus fine. Sur le périmètre de Sona, trois types de sol peuvent être distingués: (i) Sols de texture argileuse à argilo-limono-sableuse et de nature vertique (type I), correspondant aux anciennes cuvettes de décantation; (ii) Sols de texture limono-argilo-sableux (type II) dans les zones intermédiaires; et (iii) Sols limono-sableux à sablo-limoneux (type III), correspondant aux anciens bourrelets de berge. Localement, les sols sont soumis à une alcalinisation qui se traduit par une dégradation de la structure par sodisation. Ces sols, défavorables à la culture irriguée, ont été écartés de l'étude.

Les parcelles, d'une superficie nette d'environ 8 500 m², sont irriguées à la raie (raies non bouchées de 87 mètres de longueur et à 0.80 m d'écartement se déversant dans une colature). Le planage a été réalisé à une pente proche de 0.3 %. L'alimentation des raies est assurée à l'aide de siphons à partir d'un canal d'amenée. En fonction d'une dose nette supposée de 40 mm, l'irrigation est organisée à raison d'une fréquence maximale d'une irrigation tous les 4 jours permettant théoriquement de satisfaire les besoins en eau de pointe des cultures. Le calendrier cultural est organisé en deux saisons de cultures. Pendant la saison pluvieuse, l' ET_0 est modérée (proche de 5 mm.j⁻¹); les principales cultures: sorgho, maïs, gombo, niébé et arachide obtiennent des rendements satisfaisants. Pendant la saison sèche, l' ET_0 est élevée (proche de 8 mm.j⁻¹); les principales cultures: maïs, niébé, arachide et cultures maraîchères, obtiennent des rendements faibles et les parcelles les plus défavorables ont été abandonnées par les exploitants.

Performances hydrauliques des irrigations

Trois raies représentatives de chaque type de sol ont été retenues pour les expérimentations. Elles ont été réalisées en dehors des périodes de culture et seule la phase d'avancement a été suivie. Sur chacune de ces neuf raies, les expérimentations ont été réalisées pour 5 états d'humectation du sol correspondant à une période de 2, 4, 6, 8 et 10 jours depuis la précédente irrigation. Les 45 lois d'infiltration et d'avancement ont été déterminées. Conformément aux résultats attendus, la paramètre a_0 , caractérisant la capacité initiale d'infiltration, augmente en fonction du nombre de jours écoulés depuis la précédente irrigation (notion de fréquence) et le paramètre K (Eq.23) a été relié à la fréquence des irrigations pour chaque type de sol (fig. 3). b et c_0 apparaissent indépendants de l'état d'humectation et les valeurs médianes de ces paramètres ont été calculées (Eq. 21 et 22) (tab.1).

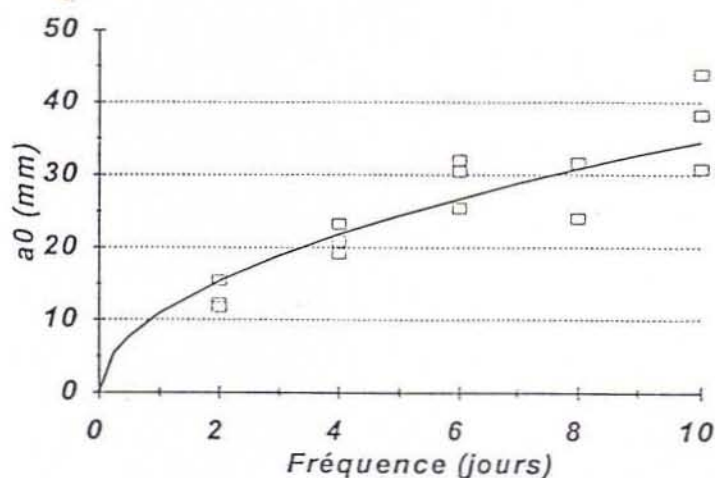


Figure 3. Evolution du paramètre a_0 (mm) en fonction du nombre de jours depuis la précédente irrigation (fréquence). Exemple du type de sol II (texture limono-sablo-argileuse).

Tableau 1. Caractéristiques des lois d'infiltration pour les trois types de sol du périmètre de SONA

Type de sol	K (mm)	b (min ⁻¹)	c_0 (mm.h ⁻¹)
Argileux (type I)	22.74	0.170	14.9
Limono-argilo-sableux (type II)	10.89	0.343	14.3
Limono-sableux (type III)	9.26	0.275	24.5

Le sol de type I est caractérisé par une forte capacité initiale et une faible capacité finale d'infiltration. Cela s'explique par sa nature argileuse et vertique. Il est néanmoins vraisemblable que la durée limitée de l'expérimentation n'est pas permis d'atteindre la conductivité hydraulique à saturation dont les valeurs attendues sont beaucoup plus faibles. A l'inverse, le type de sol III est caractérisé par une faible capacité initiale et une forte capacité finale d'infiltration, dues à l'absence de fentes de retrait et à une bonne perméabilité de ce matériau de texture légère. Le type de sol II est caractérisé par des valeurs faibles, à la fois de la capacité initiale et de la capacité finale d'infiltration.

En complément des ces expérimentations, un suivi des pratiques paysannes d'irrigation a été réalisé. Le débit d'alimentation et la durée des phases d'avancement, d'entretien et de récession ont été suivis au cours d'environ 300 irrigations. Alors que tous les siphons sont identiques, on observe de fortes variations du débit dues aux variations de la hauteur d'eau dans le canal en fonction du nombre de parcelles irriguées et de la position de la parcelle sur le réseau. Les valeurs mesurées varient de 0.253 l/s à 0.516 l/s pour une valeur médiane de 0.35 l/s qui a été retenue pour les simulations. La durée d'entretien est très faible. En effet, les paysans n'admettent pas les pertes d'eau en collature et s'attachent à interrompre l'alimentation de la raie dès que la lame d'eau atteint la colature. La durée d'entretien varie de 2 à 30 minutes pour une valeur médiane de 6 minutes qui a été retenue pour les simulations. La durée médiane de la récession est de 36 minutes. Ce résultat est proche des valeurs prédites par l'équation (19) qui a été retenue pour les simulations. La durée de l'avancement varie dans de grandes proportions: de 47 à 180 minutes. Tenant compte du type de sol concerné et du nombre de jours depuis la précédente irrigation, les durées médianes d'avancement apparaissent systématiquement supérieures aux résultats prévus par le modèle. Ce comportement a été attribué à un accroissement de la rugosité des raies d'irrigation par rapport aux conditions expérimentales où les raies avaient été soigneusement préparées et débarassées de tous débris végétaux. En supposant un accroissement du

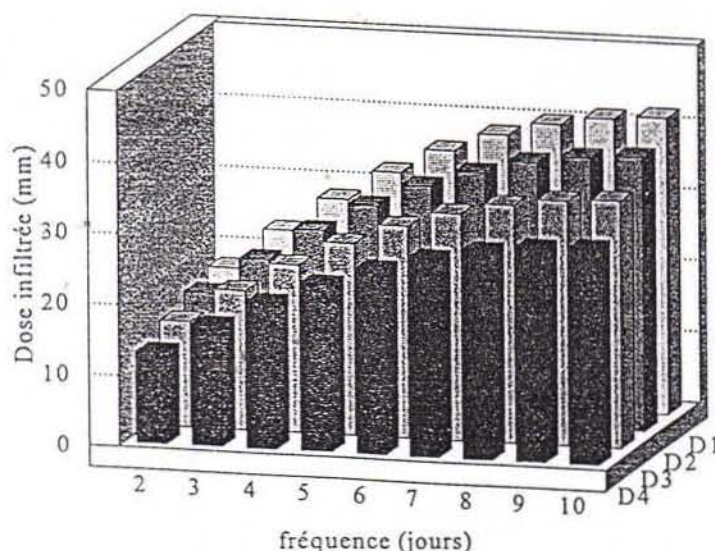


Figure 4. Résultats des simulations. Evolution de la dose infiltrée (mm) en fonction du nombre de jours depuis la dernière irrigation (fréquence) et pour chaque quart de la raie d'irrigation (de l'amont D1 à l'aval D4). Exemple du type de sol I du périmètre de Sona

coefficient de rugosité de Manning de 0.04 à 0.06, les résultats des simulations apparaissent alors conformes aux temps d'avancement observés sur les parcelles paysannes.

Les performances des irrigations ont été simulées en fonction de ces différents paramètres. A l'exemple du type de sol I (fig.4), les doses infiltrées apparaissent très variables, à la fois en fonction du nombre de jours depuis la précédente irrigation, mais aussi de l'amont vers l'aval de la parcelle. Ces résultats ont été sauvegardés dans un fichier qui pourra être utilisé pour les simulations du bilan hydrique.

Satisfaction des besoins en eau des cultures irriguées

Afin de simplifier l'exposé des résultats, seule la culture irriguée du maïs sera traitée. Une longueur de cycle de 100 jours a été retenue. Elle se décompose: (i) d'une phase de développement végétatif de 50 jours (partie aérienne et enracinement), d'une phase de plein développement de 30 jours et (iii) d'une phase de sénescence de 20 jours. Les besoins en eau ont été calculés sur la base d'un Kc_{max} de 1.05 et 1.2 et d'un Kc_{min} de 0.55 et 0.6 pour la saison pluvieuse et la saison sèche, respectivement [Doorenbos et Pruitt, 1976]. La réponse de la culture sur le cycle a été fixée à une valeur de $Ky=1.25$ et ont été distinguées: (i) une période végétative de 40 jours ($Ky=0.4$); (ii) une période de floraison de 20 jours ($Ky=1.5$); (iii) une période de formation du produit de 20 jours ($Ky=0.5$) et (iv) une période de mûrissement ($Ky=0.2$) [Doorenbos et Kassam, 1979].

Les simulations ont été réalisées pendant une période de 30 années (1958-1988) à partir des données: (i) d' ET_0 décadaire de la station bioclimatologiques la plus proche de Tillabéry; et (ii) de pluviométrie journalière du poste le plus proche de Gotheye. La pluviométrie efficace a été calculée par la méthode proposée par Casenave et Valentin [1989] (Eq. 24) pour des sols encroutés à forte porosité vésiculaire avec $a=0.9$; $b=0.05$; $c=0.002$ et $d=-10$. Elle apparaît susceptible de rendre compte du ruissellement mesuré sur les sols du périmètre voisin de Lossa [Marlet et Lidon, 1991].

La réserve utile RU et la profondeur d'enracinement des cultures ont été étudiées sur les différents sols du périmètre de Sona. Sur les sols de type I, la réserve utile varie de 140 à 200 mm.m⁻¹ et une valeur médiane de 170 mm.m⁻¹ a été considérée. La profondeur d'enracinement est apparue assez stable, autour de 60 cm. Sur les sols de type II, la réserve utile varie de 100 à 150 mm.m⁻¹ et une valeur médiane de 125 mm.m⁻¹ a été considérée; la profondeur d'enracinement varie de 30 à 60 cm et une valeur médiane de 50 cm a été considérée. Sur les sols de type III, la réserve utile est proche de 80 mm.m⁻¹; la profondeur d'enracinement atteint facilement 80 cm de profondeur, qui a été retenue dans les simulations. Sur les sols

fraîchement labourés, l'infiltration est rapide et la dose nette infiltrée a été évaluée à environ 50 mm qui a été retenu, quel que soit le type de sol, comme stock hydrique initial. Le facteur p a été considéré égal à 0.44.

Les dates de semis sont très variables, à la fois durant la saison pluvieuse et la saison sèche. A l'arrivée des premières pluies, les paysans privilégient la mise en place des cultures pluviales ou la mise en place des pépinières dans les rizières. Il s'en suit une grande variabilité de la date de semis et deux scénarios ont été retenus: (i) mise en place précoce le 1 Juillet; et (ii) mise en place tardive le 25 Juillet. En raison du décalage induit par la saison pluvieuse mais aussi en raison de différents travaux de récolte et post-récolte, la mise en place des cultures de saison sèche est aussi caractérisée par une grande variabilité et deux scénarios ont été retenus: (i) mise en place précoce le 10 Novembre; et (ii) mise en place tardive le 1 Décembre. Ces différents scénarios ont été simulés pour les 3 types de sol en fonction des hypothèses précédemment présentées. Ne seront présentés que les résultats concernant: (i) la satisfaction moyenne des besoins en eau de la culture, garantie 8 années sur 10; (ii) la satisfaction moyenne des besoins en eau pendant la période sensible de floraison, garantie 8 années sur 10; (iii) le rendement attendu en pourcentage du rendement espéré, garanti 8 années sur 10; (iv) les valeurs médianes du drainage et de la fraction de lessivage; (v) les besoins bruts en eau d'irrigation sur le cycle ou (vi) les besoins de pointe décadaire en eau d'irrigation, nécessaires 8 années sur 10 pour satisfaire les exigences d'alimentation hydrique proposées.

Pendant la saison pluvieuse (tab.2), les résultats du bilan hydrique montrent que la satisfaction des besoins en eau de la culture est globalement assurée sur le périmètre de Sona. L'aptitude des sols de type I apparait la meilleure tandis que les sols de type II obtiennent les résultats les plus faibles. Les semis tardifs sont les plus défavorables dans la mesure où le cycle de culture se poursuit après la période pluvieuse. Les besoins en eau augmentent alors sensiblement et ne sont plus couverts par les irrigations, notamment sur le type de sol II (fig. 5). Les apports d'eau sont légèrement excédentaires et permettent d'assurer une fraction de lessivage.

Tableau 2. Résultats de l'analyse fréquentielle du bilan hydrique:
Saison pluvieuse sur le périmètre de Sona

Sol	type I		type II		type III	
	précoce	tardif	précoce	tardif	précoce	tardif
Semis						
Satisfaction: cycle et période sensible (% - 8 années sur 10)	100	98	95	83	97	88
	100	100	100	97	100	99
Rendement (%espéré) (8 années sur 10)	100	98	94	79	96	85
Besoins bruts: cycle/pointe	528	586	409	454	429	477
décadaire (mm - 8 années sur 10)	73.3	76.2	56.8	59.1	59.6	62.0
Drainage (mm)/Fraction de lessivage (-) (Médiane)	94	64	41	38	71	58
	0.23	0.14	0.14	0.12	0.22	0.16

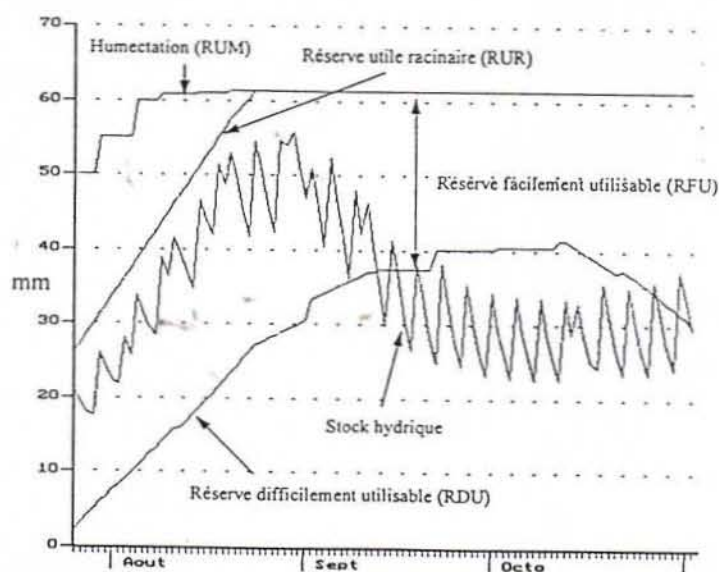


Figure 5. Représentation graphique du bilan hydrique. Exemple d'un semis tardif de saison des pluies sur le type de sol II du périmètre de Sona (année 1972)

Pendant la saison sèche (tab.3), les apports d'eau d'irrigation apparaissent insuffisants pour garantir des conditions satisfaisantes d'alimentation hydrique des cultures et de lessivage. Les rendements attendus ne sont supérieurs à 50% du rendement potentiel que sur le sol de type I alors qu'ils n'atteignent que le quart ou le tiers du rendement potentiel sur les types de sol II et III, respectivement. Ainsi, les modalités d'organisation du tour d'eau et de conduite de l'irrigation à la parcelle apparaissent inadaptées à l'objectif d'intensification des cultures irriguées pendant la saison sèche sur le périmètre de Sona. Malgré l'existence d'un stock hydrique initial de 50 mm, on observe l'apparition d'un stress hydrique après un mois de culture qui précède une détérioration encore plus marquée des conditions d'alimentation hydrique (fig. 6).

Tableau 3. Résultats de l'analyse fréquentielle du bilan hydrique: Saison sèche sur le périmètre de Sona.

Sol	type I		type II		type III	
	précoce	tardif	précoce	tardif	précoce	tardif
Semis						
Satisfaction: cycle et période sensible	76	72	55	52	62	58
(% - 8 années sur 10)	73	68	50	48	57	54
Rendement (%espéré)	59	52	25	(22)	35	31
(8 années sur 10)						
Besoins bruts:	704	704	545	545	572	572
cycle/pointe décadaire	82.0	82.0	63.8	63.8	66.8	66.8
(mm - 8 années sur 10)						
Drainage	3.8	4.1	0	0	7.0	9.9
(mm)/Fraction de lessivage (-)	0.01	0.01	0	0	0.01	0.02
(Médiane)						

Une proposition d'amélioration des modalités d'organisation des irrigations pendant la saison sèche a été évaluée sur le périmètre de Sona. L'augmentation de la fréquence des irrigations à 3 irrigations hebdomadaires conduit à une amélioration sensible des conditions d'alimentation de la culture (tab.4). Néanmoins les résultats restent encore éloignés de l'optimum, notamment sur le type de sol II qui n'atteint pas 50% du rendement espéré. Il en découle que, sur de tels sols peu perméables, les performances de modalités de gestion de l'irrigation à la parcelle sous forme de raies non bouchées relativement courtes sont incompatibles avec l'obtention de résultats agronomiques satisfaisants. Le système d'irrigation doit être profondément modifié et deux hypothèses pourraient être étudiées: (i) Irrigation par calant permettant d'accroître la surface du

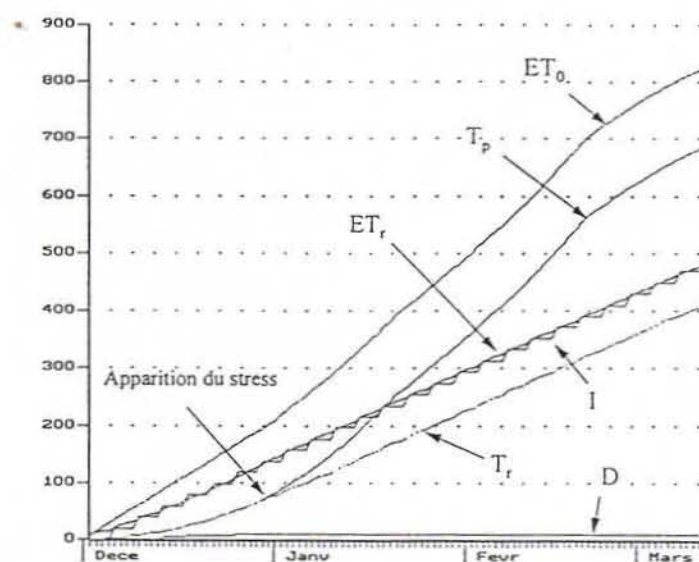


Figure 6. Représentation schématique du cumul des principaux termes du bilan hydrique. Exemple d'un semis tardif de saison sèche sur le sol de type III sur le périmètre de Sona (année 1961-1962)

Tableau 4. Résultats de l'analyse fréquentielle du bilan hydrique. Proposition d'amélioration des modalités d'organisation des irrigations (3 irrigations hebdomadaires) pendant la saison sèche sur le périmètre de Sona.

Sol	type I		type II		type III	
	précoce	tardif	précoce	tardif	précoce	tardif
Satisfaction: cycle et période sensible	87	83	66	93	76	76
(% - 8 années sur 10)	89	84	63	59	72	70
Rendement (%espéré)	83	77	44	39	64	56
(8 années sur 10)						
Besoins bruts: cycle/pointe	821	831	707	696	734	735
décadaire (mm - 8 années sur 10)	104	104	84.6	84.9	89.0	89.0
Drainage (mm)/Fraction de lessivage	8.5	1.7	0	0	15.9	124
(-)(Médiane)	0.01	0.00	0	0	0.03	0.02

sol contribuant à l'infiltration qui n'est que de 50 % environ dans le cas des raies; (ii) Irrigation en raies courtes et bouchées permettant d'assurer un stockage d'eau suffisant dans la raie au cours des irrigations.

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus démontrent que la technique d'irrigation gravitaire en raies non bouchées ne permet pas d'assurer les apports d'eau qui avaient été pris en compte lors de la conception du périmètre de Sona. Il apparaît ainsi que les performances hydrauliques du système doivent impérativement être couplées au bilan hydrique à la fois pour la conception du périmètre et pour la planification de ses modalités de gestion. Sur le périmètre de Sona, ces insuffisances permettent néanmoins d'espérer de bonnes conditions d'alimentation hydrique pendant la saison pluvieuse où les besoins en eau d'irrigation restent limités. A l'inverse, il apparaît pratiquement impossible de satisfaire les besoins en eau des cultures pendant la saison sèche sans une modification radicale du système de distribution de l'eau. Cette inadéquation du système et les mauvaises performances agronomiques obtenues ont d'ailleurs conduit une forte proportion des exploitants à l'abandon du périmètre.

Plus généralement, le travail présenté montre la possibilité d'appréhender un problème complexe par la voie de la modélisation, moyennant la réalisation d'un certain nombre de mesures de terrain pour l'acquisition des paramètres physiques caractérisant un périmètre irrigué spécifique. En ce sens, la méthode proposée, et le logiciel qui l'accompagne peuvent être considérés comme des outils opérationnels pour le développement.

BIBLIOGRAPHIE

- Casenave, A., et Valentin C., 1989. Les état de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris.
- Doorenbos, J., et W.O. Pruitt, 1976. Les besoins en eau des cultures. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n°24, Rome.
- Doorenbos, J., et A.H. Kassam, 1987. Réponse des rendements à l'eau. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n°33, Rome.
- Elliott, R.L., Walker W.R., and Skogerboe G.V., 1983. Infiltration parameter from furrow irrigation advances data. Transactions of the ASAE, 26(6), 1726-1731.
- Girousse, J.C., 1987. Estimation des volumes stockés en surface au cours d'un arrosage à la raie. Application à l'amélioration des méthodes d'évaluation des irrigation. DEA national d'hydrologie, USTL, Montpellier.
- Linacre, 1971. Empirical expression for evapotranspiration rates in discussion. Agricultural meteorology, 2, 451-452.

- Mailhol, J.C., and Gonzales, J.M., 1992. Furrow irrigation model for real time applications on cracking soils. *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE 119 (5), 768-783.
- Marlet, S., et Lidon, B., 1991. Exploitation d'un réseau d'irrigation pendant l'hivernage et efficience des pluies. Cas d'un périmètre de polyculture irrigué dans la région de Tillabéry (Niger). In: *Bilan hydrique et sécheresse en afrique tropicale*, 375-386, John Libbey eurotext, Paris.
- Philip, J.R., et Farrell, D.A., 1964. General solution of the infiltration-advance problem in irrigation hydraulics. *Journal of geophysical research*, 69 (4), 621-631.
- Smith, M., 1992. CROPWAT, un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage* n°26, Rome.
- Turbak, A., et Morel-Seytoux, H.J., 1988. Analytical solution of surface irrigations. I: Constant infiltration rate. *Journal of irrigation and drainage Engineering*, ASCE 118(2), 31-47.
- USDA-SCS, 1983. Furrow irrigation. *National Engineering Handbook*. ASAE.
- Walker, W.R., 1989. Guildelines for designing and evaluating surface irrigation systems. *FAO irrigation and drainage paper* n°45, Rome.
- Wright, J.L., 1981. Crop coefficients for estimates of daily crop evaporation. In: *ASAE, irrigation scheduling for water and energy conservation in the 80's*, 23, 18-26.

SUSTAINABILITY OF IRRIGATED AGRICULTURE

16th INTERNATIONAL CONGRESS ON IRRIGATION AND DRAINAGE

47th INTERNATIONAL EXECUTIVE COUNCIL MEETING

WORKSHOP ON CROP-WATER-ENVIRONMENT MODELS



ICID·CIID

CAIRO INTERNATIONAL CONFERENCE CENTER

Cairo - Egypt, September 17, 1996